



Association des Scientifiques
et des Ingénieurs Chinois en France

ASICEF Workshop on Interdisciplinary Research Topics

前沿科学的交叉与融合 留法学人跨学科研究论文集

陈勇 主编



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

前沿科学的交叉与融合

留法学人跨学科研究论文集

陈勇 主编



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

前沿科学的交叉与融合：留法学人跨学科研究论文集/陈勇主编.
—北京：北京大学出版社，2008.7
ISBN 978-7-301-13351-4

I. 前… II. 陈… III. 跨学科—研究 IV. G301

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 002202 号

书 名：前沿科学的交叉与融合——留法学人跨学科研究论文集

著作责任者：陈 勇 主编

责任编辑：孙 琰

标准书号：ISBN 978-7-301-13351-4/O·0745

出版发行：北京大学出版社

地 址：北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址：<http://www.pup.cn> 电子信箱：zpup@pup.pku.edu.cn

电 话：邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62752038

出版部 62754962

印 刷 者：北京大学印刷厂

经 销 者：新华书店

880 毫米×1230 毫米 A5 9.875 印张 282 千字

2008 年 7 月第 1 版 2008 年 7 月第 1 次印刷

定 价：35.00 元

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有，侵权必究

举报电话：(010)62752024 电子信箱：fd@pup.pku.edu.cn

前 言^①

全法中国科技工作者协会(简称“全法科协”, Association des Scientifiques et des Ingénieurs Chinois en France, ASICEF)自 1992 年成立以来,在团结留法科技人员,促进中法科技和教育界的交流与合作,加强留法学者、国内同行之间的联系与互动,支持、鼓励优秀科技人才以多种形式为祖国服务等方面,做了大量工作,取得了显著的成绩,为祖国的科技发展做出了积极的贡献。

全法科协与时俱进,不断壮大,现在已拥有注册会员两百余人,凝聚了一批具有很高造诣的科学技术人才。他们有的在法国的高等院校和科研机构中担任讲师、教授、研究员、主任研究员,有的在法国的企业中担任工程师、高级工程师或从事管理工作。很多从事科研工作的会员在各自的领域都取得了令人瞩目的成就,在国内外享有一定的知名度;在企业工作的会员也在管理领域有着举足轻重的地位;已经回国工作的会员在国内的行政、科研、企事业等部门中人尽其才,发挥着重要作用。

全法科协与中、法两国的科技和教育机构一直保持着密切的联系,在中法科技交流中具有独特优势。绝大多数被国内聘任的留法高级学者都是全法科协会员,其中许多会员被聘为国内高等院校和科研院所的客座教授、兼职教授和客座研究员。目前,在全法科协会员中,已有中国科学院海外评审专家 14 人,中国教育部“长江学者”特聘教授、讲座教授 5 人和“长江学者”海外评审专家 2 人。近年来,越来越多的会员加入到与国内同行交流与合作的行列中来,在联合培养硕

^① 本文为中国驻法国大使馆教育处教育参赞白章德在 2006 年 6 月全法中国科技工作者协会第一届交叉科学研讨会开幕式上的致辞,略做修改。

士、博士研究生和出国进修人员方面成效显著；在联系交流访问学者、组织中法学术会议、共同申请科研和教育项目方面取得了新的进展，有不少合作项目获得法国外交部、科技部和中国科技部联合主持的“中法先进研究计划”基金、法国科学研究中心(Le Centre National de la Recherche Scientifique, CNRS)及中国科技部重点国际合作项目、中国国家自然科学基金、中国教育部“春晖计划”基金及其他部委基金的资助。此外，在中国驻法国大使馆教育处和中国教育部“春晖计划”的支持下，全法科协从1997年起，每年都积极参与祖国西部建设，组建了支援西部建设的小组和服务团，成为留法学者支援大西北，帮助兰州、陕西和贵州地区发展科技教育和研究工作的骨干。他们开拓进取，坚持不懈，辛勤耕耘，贡献所长，功绩卓著。2005年，在“春晖计划”的大力支持下，在兰州大学成立了以留法学者为主体的第一个留学人员支援西部建设基地。该基地的创立，势必成为进一步促进西部科技发展、培养科技人才以及密切留法学者与该地区同行的高层次交流与合作的孵化器。

全法科协集中展现着留法学者的学术水平和科技风貌，可谓百花齐放、百家争鸣、各领风骚；同时也体现着崇高的人文精神和优秀的中华传统，可谓血浓于水、团结互助、求同存异、休戚与共。若用科技术语来表达全法科协的内涵，可以说它的硬件和软件都具有高品质，两者互为表里，就一定能高效运作，推出更为丰硕的成果！

中华人民共和国驻法兰西共和国大使馆

教育参赞 白章德

目 录

构形方法与多尺度部件

- 罗灵爱,范怡麟,乐军,范志伟(1)
- 一、引言:多尺度理论与微技术..... (1)
- 二、多尺度部件 (4)
- 三、立体光刻技术加工 (11)
- 四、应用前景 (12)
- 五、总结和展望 (13)
- 参考文献 (13)

微鼓泡塔中的两相流与传质过程

- 乐军,罗灵爱,G. Yves,袁权(15)
- 一、引言 (15)
- 二、微鼓泡塔的结构 (16)
- 三、微鼓泡塔内的气-液流动特征..... (18)
- 四、微鼓泡塔内的的气-液传质行为..... (24)
- 五、研究前景及展望 (26)
- 参考文献 (27)

紫外光软模纳米压印技术和应用 石剑,陈勇(30)

- 一、发展纳米加工技术的意义 (30)
- 二、纳米压印技术及其应用前景 (32)
- 三、紫外光软模纳米压印技术 (35)
- 四、紫外光软模纳米压印技术的应用 (38)
- 五、结论 (47)
- 参考文献 (47)

环糖氨基酸研究进展	谢涓, 龚勇华 (50)
一、简介	(50)
二、环糖氨基酸的研究	(54)
三、我们的工作	(68)
四、结语	(73)
参考文献	(73)
伊犁地块晚石炭世、晚二叠世古地磁极及其大地构造意义	王博, Y. Chen, 湛胜, 等 (77)
一、前言	(78)
二、古地磁采样与测量	(79)
三、测量结果	(81)
四、数据可靠性与剩磁年龄讨论	(94)
五、伊犁地块及邻区古地磁数据对比	(99)
六、古地磁数据的大地构造意义	(102)
七、结论	(105)
八、致谢	(106)
参考文献	(106)
食品代谢组学	徐 涵 (111)
一、前言	(111)
二、代谢组学的发展现状	(112)
三、代谢组学的特性	(113)
四、组学的新领域——食品代谢组学	(114)
五、食品代谢组学的工作和展望	(116)
参考文献	(119)
有机生态学和循环经济与农业项目管理	徐涵, 杨俊丰, 徐继振, 等 (121)
一、有机生态学原理	(122)
二、农业有机生态学和循环经济的项目研究实例	(129)

三、有机生态学在环境和农业方面亟待发挥作用	(141)
参考文献	(142)
换热器设计：从微型化到多尺度优化	
..... 罗灵爱,范怡麟,D. Tondeur(144)	
一、前言	(144)
二、通过微型化的强化传热——两个例子	(145)
三、多尺度优化——连接微观和宏观的桥梁	(148)
四、结论	(153)
参考文献	(154)
微流芯片技术与微流芯片实验室	陈 勇(156)
一、引言	(156)
二、微流芯片的制作技术	(158)
三、微流的物理基础	(161)
四、微流的操控和检测技术	(164)
五、微流芯片技术的应用	(166)
六、小结	(174)
参考文献	(174)
微纳米磁性材料在微控芯片中的应用	
..... 国世上,刘妍君,赵兴中,等(177)	
一、引言	(177)
二、微纳米磁性材料的性质	(179)
三、磁性微粒表面功能化修饰	(183)
四、磁性微粒表面在微流芯片中的应用	(185)
五、小结	(196)
参考文献	(197)
液晶高分子智能材料	李敏慧,P. Keller(201)
一、引言	(201)
二、向列相液晶弹性体的驱动机理	(202)

三、自组装液晶弹性体人造肌肉材料	(205)
四、结论	(218)
参考文献	(218)
稳定同位素标记分析固体废物高温厌氧降解中	
微生物功能群落	李天伦, L. Toffin, L. Mazéas, 等(222)
一、引言	(222)
二、实验方法及材料	(224)
三、结果与讨论	(227)
四、结论	(239)
参考文献	(239)
法国水资源统筹管理的启示	
一、我国的水源现状	惠方民(242)
二、法国水资源统筹管理经验	(243)
三、怎样化解我国的水危机?	(245)
四、中、法两国在环境(特别是水)方面的合作前景	(246)
五、结语	(247)
小粒子光散射测量技术的新进展	
一、引言	任宽芳(248)
二、小粒子光散射的理论发展	(251)
三、常用的光学测量技术	(259)
四、结论	(265)
参考文献	(266)
发育生物学的部分前沿学科研究现状	
一、胚胎诱导和体轴的形成	石德利(268)
二、细胞的不对称分裂、不对称运动对细胞和组织	
分化的作用	(271)
参考文献	(274)

以糖为基础的新药研究	张勇民(275)
一、引言	(275)
二、糖科学与人类疾病	(276)
三、糖类药物的研究	(277)
参考文献	(282)
趋磁螺旋菌 AMB-1 的细胞极性与磁小体链磁极性 之间的关系	张风丽,赵三军,吴龙飞,等(283)
一、引言	(283)
二、AMB-1 在外加磁场中的细胞排列	(285)
三、极性蛋白 IcsA 在大肠杆菌中的表达和定位	(286)
四、极性蛋白 IcsA 在 AMB-1 中的表达和定位	(286)
五、在外加磁场条件下极性蛋白在 AMB-1 中的 定位	(287)
六、讨论与结论	(288)
参考文献	(289)
图论中的极值哈密顿问题	李 皓(291)
参考文献	(301)
后记	(303)

构形方法与多尺度部件

罗灵爱^{1*}, 范怡麟¹, 乐军^{1,2}, 范志伟^{1,3}

¹ Laboratoire Optimisation de la Conception et Ingénierie de l'Environnement (LOCIE), Université de Savoie, Campus Scientifique, Savoie Technolac, 73376, Le Bourget-Du-Lac cedex, France

² 中国科学院大连化学物理研究所, 大连, 116023, 中国

³ 华东理工大学化学工程联合国家重点实验室, 上海, 200237, 中国

摘要 由 A. Bejan 提出的构形方法 (constructal approach) 最近引起了各国学者的普遍关注并正在被应用到各个学科中. 构形方法与分形方法 (fractal approach) 类似, 都是通过几个介观尺度构建微观世界 (设备或物质在最小尺度上的结构) 与宏观世界的连接; 而其与分形方法的根本差异在于, 分形的“尺度不变性” (scale-invariance) 在某种意义上被构形的“尺度协变性” (scale-covariance) 所代替. 构形方法的核心在于通过多尺度系统的逐级优化 (介观尺度数也是一个优化参数), 合理配置系统的不完美性, 实现系统整体性能最优化. 本文将着重阐述下列问题: 构形方法的介绍; 多尺度部件的一些实例 (换热器、流体分布器, 流体分布器与换热器的连接, 构形混合器及其与微反应器的集成); 加工方法; 应用前景及展望.

关键词 构形方法; 多尺度部件; 换热器; 流体分布器; 混合器; 反应器.

一、引言: 多尺度理论与微技术

1. 分形方法与构形方法

多尺度结构普遍存在于自然界和工业过程中. 以多孔介质中的气体储存为例^[1], 分子尺度上的纳米孔、颗粒尺度上的大孔以及米 (m) 数

* 作者联系方式: 电话: 33-4-79758193; 传真: 33-4-79758144; 电子邮件: Lingai.Luo@univ-savoie.fr.

量级储罐尺度上的气体传输通道,构成了系统复杂的多尺度结构.显然,不同尺度上的孔道应该合理衔接并优化,以在保证气体存储速度的同时实现存储量最大化.近年来,微技术与微系统的快速发展也使我们越来越多地考虑如何将微观世界与宏观世界合理连接的问题.

多尺度问题有多种表现形式,包括对现有系统的外部几何描述(例如 Brittany 海岸线到底有多长的问题促进了分形几何学的快速发展),对系统内部发生的过程描述(例如催化系统中的传质过程),多尺度自然系统的形成机理(生物组织、水道网络的形成),工程上多尺度系统的优化设计(本文的研究重点),等等.

分形方法是多尺度优化的先驱,它基于“尺度不变性”这个简单前提,认为不同尺度上的结构具有自相似性^[2,3],即部分结构在形式上与整体结构相似.作为一种从大到小的无限过程,分形可以非常近似地描述自然界中的许多几何形状和结构(例如海岸线长度);而仔细研究,就会发现自然界实际上并不是一个分形结构,至少在许多尺度上

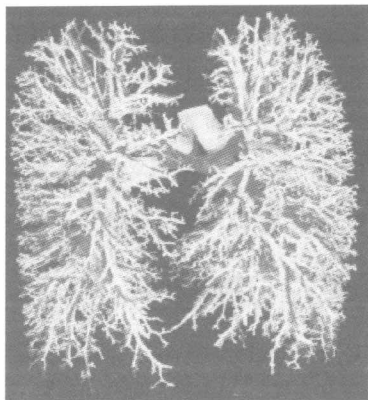


图 1.1 人体的支气管网及肺导管系统

不能用分形来描述.以人体的支气管网为例,它由处于 23 个不同尺度的支气管与腺泡组成(图 1.1)^[4].不同尺度的支气管之间存在一定的尺度规律,但是并不构成分形.从工程应用的观点来看,尺度不变性也不合理,这不仅因为相关的机理并不一定在所有尺度都相同,还因为外部结构的限制有时使得分形结构不能实

现.因此,我们需要一种更普遍和更有弹性的原则,以进行工程优化.

构形方法是二十多年来热力学优化创新研究的一种延续,它通过研究系统或设备的结构与性能之间的关系达到工程优化的目的.对于

一个流动系统,不管是水、气、电还是其他流体,其流动过程中必然会遇到阻力、摩擦、耗散等问题,使能量发生流失,无法有效利用.因此,整个系统注定是不完美的.我们能做的,就是通过几何学的方法对这种不完美进行合理配置.通常的解决方法是明确系统的控制变量及其取值极限,建立控制方程,找出约束条件,选定优化目标,求出达到优化目标的最优路径.具体地说,对于一个优化目标(例如换热效率、降压、紧凑度等),在特定约束(例如时间、体积、成本等)下对多尺度系统的耗散在时间、空间或整体结构上进行均匀分配,使其对整体的影响降到最低;从而把一个物理问题转变为一个数学问题,并进而转变为其几何形状的优化问题.

与分形方法类似,构形方法也是通过几个介观尺度构建微观世界与宏观世界的连接;而这两者的根本差异在于,分形的“尺度不变性”在某种意义上被构形的“尺度协变性”所代替.此理论受湍流和天体物理学^[5]的启发并由 A. Bejan^[6~8]发展.此外,分形是一个从大到小的无限过程,它将系统不断地分割,一直到无限小.分形的过程在时间方向上从大到小,是描述性的和非决定性的;而构形方法却正好与其“相反”,在进行系统结构设计时,从有限小的结构单元优化开始,将较小的单元结构不断组合为更大的结构,整个过程通过逐级构建来实现.构形方法在时间方向上从小到大的,是可预测的和决定性的.

2. 多尺度设计与微技术

微技术的快速发展可以解决多尺度部件中微观尺度和介观尺度上某些精细结构的加工问题.借助于微加工方法,如微机械加工,电火花腐蚀,立体光刻,深度 X 射线光刻、电铸成模、微塑铸(三者统称 LIGA 技术)以及硅微加工技术等,可以制造出非常精细的结构.同微电子工业的发展类似,这些技术在原则上可以被用来对微结构部件进行规模化生产,通过并行放大(numbering up),形成微结构部件阵列,实现工业应用.

然而,大量微结构部件的组合是一类很棘手的问题.此时,流体在不同部件间的均匀分配显得尤为关键,因此需要采用多尺度方法来设计合理的介观尺度结构,以优化微观尺度与宏观设备尺度之间的连接.构形方法刚好可以被用来解决此类问题.

二、多尺度部件

1. 换热器

图 1.2 所示的为德国卡尔斯鲁厄研究中心(Forschungszentrum Karlsruhe)加工的一个错流式微换热器^[9,10].它由精密机械加工的薄铝板交错叠加焊制成形,其有效换热体积为 1 cm^3 ;在每个流动方向上有 2000 个微通道,通道尺寸为 $70\text{ }\mu\text{m}\times 100\text{ }\mu\text{m}$,由 $100\text{ }\mu\text{m}$ 厚的间壁隔开.采用水-水介质换热的实验结果表明该微换热器性能优异:总传热系数在 $20\text{ kW}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 数量级,相当于体积功率 $18\text{ }000\text{ MW}/\text{m}^3$!然而,此类微换热器仍存在一些缺陷和局限性,限制了它的工业应用:一方面,高换热性能带来高压降损失(高于 4 bar ^①)、相对小的温差(约

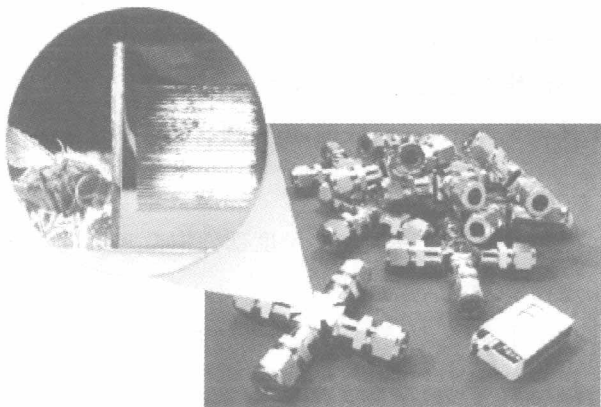


图 1.2 错流式微换热器

① $1\text{ bar}=100\text{ kPa}$.

10℃)和极短的停留时间(约2 ms);另一方面,纤细的通道对腐蚀性、粗糙度和表面污垢很敏感.此外,组装、检修、维护困难大,整个系统的体积和加工成本都很可观^[11].

因此,寻求方法来解决微结构部件间的组合,以形成宏观尺度的设备进行工业应用.我们认为,这是微技术能被用于规模生产的关键所在,而构形方法可以致力于该问题的解决.采用构形方法,我们可以设计一个“具有微结构的宏观换热器”(micro-structured macro-heat exchanger),实现一定压降下的换热性能优化.

图 1.3 所示的为采用立体光刻(stereolithography)技术加工的含有四个尺度通道的构形换热器样品.该换热器的布局模仿血管系统(如含有宏观入口和出口的微血循环系统),冷、热流体的入口和出口通道分别位于换热器的四个垂直边缘,互相成对角配置.流体 1 先从直径较大的进口通道(尺度 1)进入,被分配到位于立方

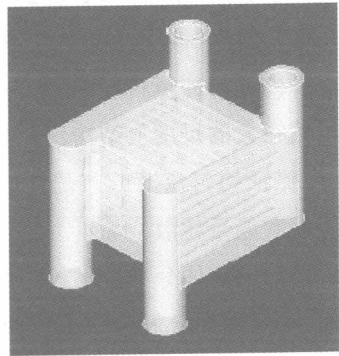


图 1.3 构形换热器

方体换热器表面的水平通道中(尺度 2);然后进入位于立方体内部的水平通道(尺度 3);接着流体继续流经一排具有最小尺度的垂直通道(尺度 4,此处通道特征尺寸最小,换热面积最大);最后每股流体都汇集到流体 1 的出口通道中.流体 2 也重复上述的分配过程.这样,两股流体可以在每个尺度上都实现热量交换,但换热主要集中在最小尺度(即尺度 4).与高性能的板式换热器相比,构形换热器的空间利用效率更高,结构更紧凑.每个尺度上的通道结构都可以进一步优化,以实现一定压降条件下传热量或换热面积最大化.

可以预见,这种设计的优势在于:

- (1) 与常规换热器相比,换热面积更大;

(2) 传热主要集中在微观尺度,传热系数较高;

(3) 通道并行配置,不存在压降累积,总压降经构形方法优化后平均分布在各个尺度;

(4) 模块化设计,例如图 1.3 所示的换热器模块可通过并联或串联连接,形成大规模的宏观换热器。

2. 流体分布器

众所周知,非均匀的流动分布(或流动分布偏离预定的状态)是导致化工设备(例如列管式反应器、换热器和用来存储气体的多孔介质体系等)整体性能下降的一个重要原因。解决此类问题的通用做法是在设备内部添加填料(例如熔块、多孔塞、颗粒层和编织布等),这些填料虽然在大的尺度上结构比较规则,但在更小的尺度上结构则杂乱无章。在保证均匀流动分布的同时引入这些填料,将导致设备内部较高的压降和能量耗散。

理想的流体分布器不仅需要满足流体均匀分布的要求,还应满足其他目标(例如最低压降、最低耗散和最小通道体积等)。这些目标在一定程度上是相互牵制的(例如通道直径越小,整个分布器的体积会越小,然而压降将会越大),因此可以在多种目标的协调中实现优化。我们在此提出“多尺度流体分布器”的概念,它可以将一定流量的流体均匀分布到一组规则排布的通道中,实现流体驻留时间最短,耗能最少。我们用立体光刻技术加工成形了第一批构形流体分布器(图 1.4)。在通道直径不太大、尺度不太多的情况下,分叉可以限于二维平面,以增加紧凑度;反之,分叉可以在三维展开,在 T 形接头和 90° 弯头处采用圆滑过渡,以减小压降损失。进口流体(例如流量为 300 L/h)通过该分布器的二分叉树状结构(每个分支进一步向下细分为两个分支)在出口被细分为 256 股支流,占据约 $6\text{ cm} \times 6\text{ cm}$ 的正方形截面。各股流体流经每个尺度上的通道尺寸都完全一致。不同尺度上的通道直径的分布采用 Murray 准则进行优化,尺度规律比为 $2^{1/3}$ ^[12]。我们通过高速

摄像机对分布器中的流体分布状况进行了观察,定性证明了该分布器的流体均匀分布能力^[13].

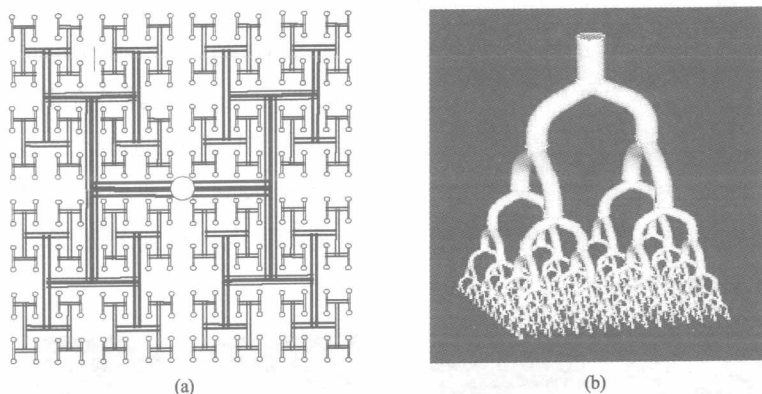


图 1.4 具有二叉树状结构的构形流体分布器:

二维平面结构(a)和三维圆滑过渡结构(b)

当实验工况有所扰动或分布器上某处有物理缺陷时,结构如图 1.4 所示的流体分布器的性能可能会受到影响.初步实验证实,当通道某处发生堵塞时,流体能自动重新分配,对系统整体的影响并不大.此外,按照二叉原则设计的分布器,其几何形状比较固定(例如出口区为正方形).因此,为了获得更多的几何自由度及提高故障操作时分布器的性能稳定性,需要基于类似的原则设计更多样化的结构(例如四分叉树状结构^[13]).这将是一个重要的研究方向.

3. 流体分布器与换热器的连接

换热器设计中经常被忽视的一个问题就是流体分配的不均匀性(尽管换热器制造商对此已经有所认识).对一个立方体错流换热器的数值模拟结果表明,流体在中心通道中的流量可能是边缘通道中的 3~5 倍.因此,我们认为,如果在换热器的入口和出口处引入构形分布器,将会改善流体分布状况,从而在基本不增加压降损失的前提下实现强化传热.